

*А. Г. ГУРИН, Є. С. МОСКВІТІН*

### **ЗМІНА ПОКАЗНИКІВ ПАПЕРОВО-МАСЛЯНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В УМОВАХ ДОВГОТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Запропоновано модель зміни параметрів паперово-масляної ізоляції при впливі кліматичних умов експлуатації силового трансформатора. Ремонтні та профілактичні роботи, зміни добових та середньорічних параметрів температури призводить до зміни фізико-хімічних властивостей паперово-масляної ізоляції. Перебування в умовах знижених температур призводить до втрати рухливості трансформаторного масла, яка супроводжується кристалізацією парафінових вуглеводнів, що утворюють кристалічну сітку, всередині якої утримуються рідкі вуглеводні масла. При зниженні температури невелика кількість утвореного твердого парафіну різко підвищує температуру застигання і сприяє подальшому збільшенню в'язкості масла. При довготривалій експлуатації розміри кристалів збільшуються, ступінь їх упорядкованості збільшується оскільки в паперово-масляній ізоляції міститься до 10 % трансформаторного масла, то процеси парафінування паперових і міжшарових прошарків масла в основному визначаються хімічними процесами в маслі, та інтенсивністю парафінування поверхні паперу, залежної від ступеню її полярності. Більш щільні сорти паперу володіють слабким зчепленням з парафіном; менш щільні, типу К-120, парафуються на більшу глибину. Парафінування паперово-масляної ізоляції призводить до зміни її властивостей, коли парафін, що відклався всередині та на поверхні переводить її з розряду гідрофільних до гідрофобних. Витіснена з паперу волога разом з емульсованою вологою з масла скупчуються у проміжках розпушеного паперу, створюючи умови збільшення струмів витoku та збільшення кута діелектричних втрат. Такі зміни у структурі паперово-масляної ізоляції впливають на форму та спектр часткових розрядів, збільшуючи частку низькочастотних складових від наскрізних розрядів між шарами паперу.

**Ключові слова:** силовий трансформатор, паперово-масляна ізоляція, парафування паперу

*А. Г. ГУРИН, Е. С. МОСКВИТИН*

### **ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Предложена модель изменения параметров бумажно-масляной изоляции при воздействии климатических условий эксплуатации силового трансформатора. Ремонтные и профилактические работы, изменения суточных и среднегодовых параметров температуры приводит к изменению физико-химических свойств бумажно-масляной изоляции. Пребывание в условиях пониженных температур приводит к потере подвижности трансформаторного масла, которая сопровождается кристаллизацией парафиновых углеводородов, образующих кристаллическую сетку, внутри которой содержатся жидкие углеводороды масла. При снижении температуры небольшое количество образованного твердого парафина резко повышает температуру застывания и способствует дальнейшему увеличению вязкости масла. При длительной эксплуатации размеры кристаллов увеличиваются, степень их упорядоченности увеличивается поскольку в бумажно-масляной изоляции содержится до 10% трансформаторного масла, то процессы парафирования бумажных и межслоевых прослоек масла в основном определяются химическими процессами в масле, и интенсивностью парафирования поверхности бумаги, зависящей от степени ее полярности. Более плотные сорта бумаги обладают слабым сцеплением с парафином; менее плотные, типа К-120, парафируются на большую глубину. Парафирование бумажно-масляной изоляции приводит к изменению ее свойств, когда парафин, что отложился внутри и на поверхности переводит ее из разряда гидрофильных к гидрофобным. Вытеснена из бумаги влага вместе с эмульсированной влагой из масла скапливаются в промежутках разрыхленного бумаги, создавая условия увеличения токов утечки и увеличение угла диэлектрических потерь. Такие изменения в структуре бумажно-масляной изоляции влияют на форму и спектр частичных разрядов, увеличивая долю низкочастотных составляющих от сквозных разрядов между слоями бумаги.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, бумажно-масляная изоляция, парафирование бумаги

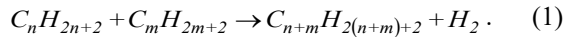
*A. G. GURIN, E. S. MOSKVITIN*

### **CHANGES IN PAPER-OIL POWER TRANSFORMERS INSULATION IN LONG-TERM EXPLOITATION**

A changes model of paper-oil insulation parameters under the climatic conditions influence of a power transformer exploitation is proposed. Repairs and preventive works, changes in daily and average annual temperature parameters lead to changes in the physical and chemical properties of paper-oil insulation. Staying at low temperatures results in the mobility loss of the transformer oil, which is accompanied by paraffinic hydrocarbons crystallization, which form a crystalline network, within which liquid hydrocarbon oils are contained. By lowering the temperature, the small solid paraffin amount formed dramatically increases the freezing point and further increases the oil viscosity. With long-term exploitation the crystal size increases, the ordering degree increases because the paper-oil insulation contains up to 10% of transformer oil, the initialization processes of paper and oil interlayers are mainly determined by the chemical processes in oil, and the paraffin polarity intensity. The denser paper grades have poor adhesion to paraffin; less dense, type K-120, initiated to greater depth. Initialisation of paper-oil insulation leads to change of its properties when the paraffin which is deposited inside and on a surface transfers it from the category hydrophilic to hydrophobic. Moisture displaced from the paper together with the emulsified moisture from the oil accumulate in the paper looseness, creating conditions for increasing leakage currents and increasing the dielectric loss angle. Such changes in the paper-oil insulation structure affect the shape and partial discharges spectrum, increasing the low-frequency components fraction from the through discharges between paper layers.

**Keywords:** power transformer, paper-oil insulation, paper waxing

**Вступ.** П. А. Флоренський, а пізніше Г. Н. Сканаві [1] досліджували питання утворення парафінів у відчищеному згущеному маслі при низьких температурах експлуатації та одночасному впливі електричного поля. Ці два фактори сприяють розвитку хімічних процесів в маслі, стимулюють реакцію між різними вуглеводнями, що входять до його складу, створюючи більш тяжкий вуглеводень і водень за схемою:



Складні хімічні процеси в трансформаторному маслі Флоренський застосував для пояснення зміни умов пробю масла при довготривалій експлуатації, коли на підвищення в'язкості масла й утворення парафінових осадів впливають напруженість електричного поля та температура експлуатації.

Парафінування паперово-просоченої ізоляції призводить до зміни її електричних властивостей і міцності.

Найбільша інтенсивність парафінування спостерігається на початку експлуатації трансформатора, потім швидкість відкладання знижується внаслідок збільшення шару парафіну. Особливістю цього процесу є нерівномірна зміна по товщі ізоляції гідрофільного стану ПМІ до гідрофобного. Якщо на поверхнях вода створює суцільний прошарок і масло просочується у вигляді краплин, то в цьому випадку парафінування проходить менш інтенсивно. На гідрофобних (зовнішніх сторонах ізоляції) наявність води в маслі викликає більш інтенсивне створення парафінового прошарку, який поступово зменшується за рахунок зменшення адгезії наступних шарів парафіну. Наявність парафінового прошарку перерозподіляє напруженість поля, збільшуючи її в парафіні (діелектрична проникність ПМІ складає 3.5 – 4, а парафіну – 2.2). Це створює умови переходу коронного розряду у ковзкий, що розповсюджується уздовж поверхні ізоляційного шару. Найбільш висока напруженість перекриття спостерігається у парафіну, а найменша – у ПМІ, що сильно адсорбує вологу на своїй поверхні. Аналізуючи форму та спектр часткових розрядів можна зробити висновок, що часткові розряди у новому стані ізоляції мають більш високочастотний склад в діапазоні 1 – 1.5 МГц. У трансформатора, що тривало працює, поряд з високочастотними складовими з'являються частоти до 200 кГц, які виникають за рахунок більш тривалих розрядів, що ковзають по поверхні міжкотушкової і головної ПМІ, та розрядів у газових бульбашках продуктів деструкції ПМІ за рахунок нагрівання, впливу електричного поля, електролізу, кавітації та інших.

**Мета роботи.** Метою даної статті – показати причини змін у амплітудному та фазовому спектрі часткових розрядів у паперово-масляній ізоляції силових трансформаторів при старінні трансформаторного масла під впливом кліматичних і температурних змін в процесі експлуатації та фізико-хімічних процесів у паперово-масляній ізоляції.

Підвищення гідрофобності ПМІ призводить до зміни вологості паперу та масла. Витіснена з масляних шпарин паперу волога дрібними краплями

розташовується між шарами паперу, а молекулярна волога утворює водяні суспензії в маслі (рис. 1).

У міжкотушковій і міжфазовій паперово-просоченій ізоляції, коли на поверхні розділу двох діелектриків діють сили, що виникають в результаті взаємодії електричного поля з пов'язаними зарядами поляризованого діелектрика, які можуть викликати рух і деформацію шарів води, та масла в міжшаровому просторі. У випадку, коли поверхня діелектриків нормальна до напрямку поля, прошарок води буде виштовхуватись з силою:

$$F = \frac{l}{2} \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon_l) \cdot \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_2} \cdot E_l^2, \quad (2)$$

де  $\epsilon_1$  і  $\epsilon_2$  – діелектрична проникність трансформаторного масла та води,

Е1 – напруженість електричного поля, утворюючи на поверхні парафінованого паперу ділянки з підвищеною провідністю.

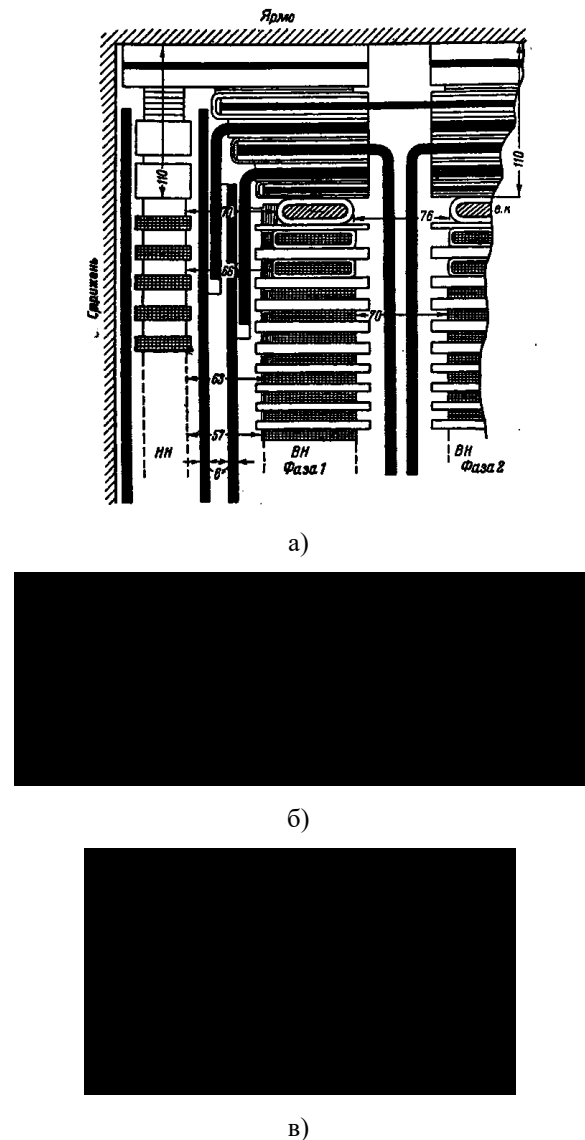


Рисунок 1 – Конструкція головної (а) та міжкотушкової ізоляції (б) з паперово-масляної ізоляції

Це, у свою чергу, викликає зміну розподілу напруженості електричного поля на поверхні твердого гідрофобного покриття. Найбільша нерівномірність буде на крайніх ізоляційних шарів між котушками та між окремими витками, а напруженість електричного поля уздовж шару паперової ізоляції буде змінюватись згідно:

$$E_x = U \cdot \gamma \frac{\cosh \eta(l-x)}{\sinh \eta l}, \quad (3)$$

$$\text{де } \gamma = \sqrt{\frac{(1/R_1) + j\omega\omega_1}{(1/R_2) + j\omega\omega_2}},$$

$R_1$  – об'ємний опір паперу, Ом·м,

$R_2$  – поверхневий опір, Ом·м,

$C_1$  – питома ємність поверхневого шару паперу, Ф/м<sup>2</sup>,

$C_2$  – питома ємність парафінованого шару, Ф/м<sup>2</sup>.

З урахуванням того, що шар парафінованого паперу має:

$$1/R_1 \ll C_1 \text{ та } 1/R_2 \ll C_2, \quad (4)$$

то можна прийняти:

$$\gamma = \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}. \quad (5)$$

Розподіл напруженості поля практично не зміниться, але збільшення амплітуди напруги у витків котушки збільшиться в 1.5 ÷ 2 рази за рахунок зниження діелектричної проникності паперово-просоченої ізоляції в 3.5 ÷ 4 до 2 ÷ 2.5. Це призводить до посилення процесу іонізації, розвитку поверхневих розрядів, посиленню хімічних реакцій розкладання парафінованого масла та водно-масляної емульсії з виділенням газових бульбашок водню та інших газів.

Згідно теорії Флоренського за умови для пробою газових бульбашок можна прийняти залежність:

$$\frac{\eta}{\sigma} f(\alpha) = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{3 \cdot \theta}, \quad (6)$$

$$\text{де } f(\alpha) = \frac{\Delta S}{\Delta t},$$

$\eta$  – в'язкість трансформаторного масла,

$\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу,

$a = \frac{dn}{dt}$  – швидкість збільшення газових молекул у

бульбашках до моменту відриву,

$\theta$  – постійна,

$\Delta t$  – проміжок часу між відривом двох бульбашок у тому самому місці поверхні,

$S$  – відстань між центрами близьких бульбашок,

$n$  – кількість газових молекул водню, що дорівнює кількості пар вуглеводневих молекул, які прореагували.

Тобто, при тривалій експлуатації можливе створення та збільшення у обсязі бульбашок газу, здатних до пробою багатшарової ПМІ в електричному полі головної та поздовжньої ізоляції трансформатора.

Оскільки електрична міцність газів набагато нижча, ніж міцність трансформаторного масла, то пробій може виникнути в газовій бульбашці, в основному заповненій сумішшю водню з іншими газами.

Зміна електричних характеристик та гідрофільності ПМІ при довготривалій експлуатації трансформатора призводить до зміни характеристик коронного, наскрізного та ковзних розрядів.

Розпушення паперової ізоляції під дією електродинамічних навантажень на котушки трансформатора призводить до прискорення процесу парафінування ізоляції витків, яка зменшуючи діелектричну проникність ПМІ, а, відповідно, підвищує напруженість електричного поля на поверхні мідного провідника котушки і інтенсивність іонізаційних процесів.

Витіснена з паперу та масла вода притягується до потенціального провідника котушки, створюючи у міжшаровому просторі ПМІ осередки з підвищеною електропровідністю, що сприяє подальшому розвитку ковзних розрядів, які можуть перейти у розряд наскрізних.

Кожен з типів розрядів визначається у змінах амплітуд-частотної та фаз-частотної характеристик, що дозволяє використовувати наявні методи діагностики часткових розрядів у ПМІ трансформаторів.

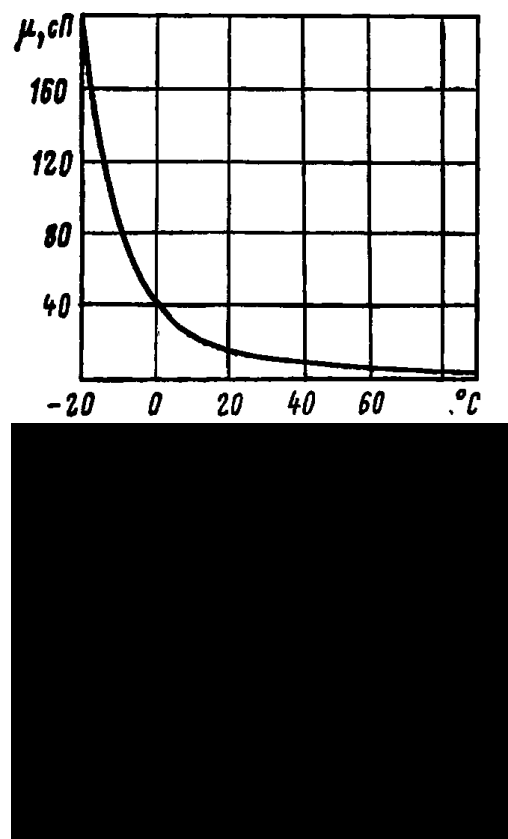


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості трансформаторного масла та діелектричних втрат паперово-масляного діелектрика від температури

В залежності від ступеню старіння ізоляції імпульс часткових розрядів вміщує інформацію від окремих видів дефектів трансформатора, які

впливають на спектр фронту імпульсу. За період старіння ізоляції тривалість фронту збільшується від десятків до сотень наносекунд. Розвиток ковзних розрядів буде розширювати тривалість реєстрованих імпульсів до  $10 \div 12$  мкс та розширенням фазової діаграми на більшу частину синусоїди напруги.

**Висновки.** 1. Довготривала експлуатація силового трансформатора в умовах зміни температури навколишнього середовища викликає збільшення в'язкості масла, утворення парафінових вуглеводнів.

2. Парафінування паперово-масляної ізоляції призводить до її гідрофобності та витісненню води у міжшарові проміжки паперової ізоляції, збільшуючи діелектричні втрати.

3. Перерозподіл діелектричних параметрів паперово-масляної ізоляції призводить до утворення ковзних розрядів уздовж шарів паперу.

4. Зміна амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик сигналів при діагностиці ступеню її старіння, дозволяє більш детально вивчати окремі етапи фізико-хімічних перетворень від часткових розрядів.

#### Список літератури

1. Г. И. Скани, Физика диэлектриков (область сильных полей) / Гос. изд-во физико-математической литературы, М.: 1958 – 907 с.
2. Техника высоких напряжений, Леопольд, Рот. Пер. с нем., Гос. изд-во, М-Л, 1930.
3. А. Д. Зимон, Адгезия жидкости и смачивание, М.: «Химия», 1974 – 414 с.
4. Г. С. Кучинский, Г. Г. Лысаковский, Ю. В. Березин, В. Л. Федоров, Влияние увлажнения на электрические характеристики бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа при переменном напряжении промышленной частоты // «Электричество», № 10, 1960, с. 69 – 72.
5. Ушаков В. Я., Климин В. Ф., Коробейников С. М., Лопатин В. В., Пробой жидкостей при импульсном напряжении / Томск : Изд-во НТЛ, 2005 – 488 с.
6. В. Н. Пастухов, К расчету характеристик искры в воде, «Электронная обработка материалов», № 1 (31), 1970 – с. 63 – 64.
7. И. З. Окунь, Исследование при импульсном разряде в воде, ЖТФ, т. XLI, в. 2, 1971 – с. 292 – 300.
8. Туйчунова А. Г., Совершенствование содержания изоляции силовых масло-наполненных трансформаторов тяговых подстанций с учетом климатических условий, Автореферат дис. к. т. н., Красноярск, 2011 – 21 с.
9. Н. В. Юдина, Н. В. Полякова, Кристаллизация нефтяных парафинов, Известия Томского политехнического института, 1977, т. 3ао, с. 129 – 131.

10. Г. М. Михеев, Экспериментальное исследование выделения водорода из диэлектрической жидкости методом лазерной спектроскопии, Вестник Чувашского университета, 2013, № 3, с. 208 – 212.

11. Исакиев Э. Х., Недоспасов А. В., Тюфтяев, А. С., Гаджиев М. Х., Акимов П. Л., Влияние одиночных пузырьковых воздуха и элегаза на электрический пробой трансформаторного масла, Объединенный институт высоких температур РАН, Москва.

12. Е. Г. Ермаков, Исследование характеристик частичных разрядов при различных видах дефектов в силовых трансформаторах // Научно-технические ведомости СПб изд-во Политехнического университета, 2009 – с. 172 – 177.

#### References (transliterated)

1. G. I. Skanavi, Fizika dielektrikov (oblast silnykh poley) / Gos. izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, M.: 1958 – 907 s.
2. Tehnika vyisokikh napryazheniy, Leopold, Rot. Per. s nem., Gos. izd-vo, M-L, 1930.
3. A. D. Zimon, Adgeziya zhidkosti i smachivanie, M.: «Himiya», 1974 – 414 s.
4. G. S. Kuchinskiy, G. G. Lyisakovskiy, Yu. V. Berезin, V. L. Fedorov, Vliyanie uvlazhneniya na elektricheskie harakteristiki bumazhno-maslyanoy izolyatsii kondensatornogo tipa pri peremennom napryazhenii promyshlennoy chastoty // «Elektrichestvo», # 10, 1960, s. 69 – 72.
5. Ushakov V. Ya., Klimkin V. F., Korobeynikov S. M., Lopatin V. V., Proboy zhidkostey pri impulsnom napryazhenii / Tomsk : Izd-vo NTL, 2005 – 488 s.
6. V. N. Pastuhov, K raschetu harakteristik iskry v vode, «Elektronnaya obrabotka materialov», # 1 (31), 1970 – s. 63 – 64.
7. I. Z. Okun, Issledovanie pri impulsnom razryade v vode, ZhTF, t. XLI, v. 2, 1971 – s. 292 – 300.
8. Tuiychnova A. G., Sovershensovanie soderzhaniya izolyatsii silovyykh maslo-napolnennykh transformatorov tyagovyykh podstantsiy s uchetom klimaticheskikh usloviy, Avtoreferat dis. k. t. n., Krasnoyarsk, 2011 – 21 s.
9. N. V. Yudina, N. V. Polyakova, Kristalizatsiya neftyanykh parafinov, Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo instituta, 1977, t. 3ао, s. 129 – 131.
10. G. M. Miheev, Eksperimentalnoe issledovanie vyideleniya vodoroda iz dielektricheskoy zhidkosti metodom lazernoy spektroskopii, Vestnik Chuvashskogo universiteta, 2013, # 3, s. 208 – 212.
11. Isakiev E. H., Nedospasov A. V., Tyuftyaev, A. S., Gadzhiev M. H., Akimov P. L., Vliyanie odinichnykh puzyrkov vozduha i elegaza na elektricheskiy proboy transformatornogo masla, Ob'edinennyiy institut vyisokikh temperatur RAN, Moskva.
12. E. G. Ermakov, Issledovanie harakteristik chastichnykh razryadov pri razlichnykh vidah defektov v silovyykh transformatorah // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPb izd-vo Politehnicheskogo universiteta, 2009 – s. 172 – 177.

Надійшло (received) 18.11.2019

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Гурин Анатолій Григорович (Гурин Анатолий Григорьевич, Gurin Anatoly Hrigorovich)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, Web of Science ResearcherID: U-7535-2017, тел. (057) 707-66-63, E-mail: Agurin@kpi.kharkov.ua

**Москвітін Євген Сергійович (Москвитин Евгений Сергеевич, Moskvitin Eugene Sergiyovich)** – кандидат технічних наук, старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, Web of Science ResearcherID: Y-2687-2019, ORCID: 0000-0002-0219-8642, тел. (057) 707-60-10, E-mail: Moskvitin@kpi.kharkov.ua